حل بستهٔ اندرکنش سد و مخزن بااحتساب لزجت و اثر جذب کف مخزن*

(یادداشت پژوهشی)

مریم یاسمی(۱)　　بهرام نوائی‌نیا(۲)　　جواد واثقی امیری(۳)　　مهدی علیجانی اردشیر(٤)

چکیده *در این تحقیق حل بستهٔ اندرکنش سد و مخزن بااحتساب اثر ویسکوزیتهٔ سیال مخزن و جذب انرژی توسط رسوبات کف مخزن تحت بارهای هارمونیک ارائه می‌گردد. بدین منظور معادلات حاکم بر محیط مخزن و سد در محدودهٔ فرکانس حل و باتغییر پارامترهای مختلف، پاسخ فشار هیدرودینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که درنظر گرفتن لزجت سیال باعث پیچیده‌تر شدن روابط می‌شود؛ پاسخ‌ها به‌مقدار لزجت، میزان ضریب جذب کف مخزن، پریود تحریک و نیز پریود طبیعی سیستم سد-مخزن وابسته است؛ باافزایش مدول الاستیسیته سد، تغییرمکان تاج سد و فشار هیدرودینامیک مخزن کاهش می‌یابد.*

واژه‌های کلیدی حل بسته، ویسکوزیتهٔ سیال، سدهای بتنی وزنی، فشار هیدرودینامیک، اندرکنش سد و مخزن.

A Closed Form Solution of Dam Reservoir Interaction Considering Water Viscosity and Reservoir Bottom Absorption Effect

M. Yasami　　B. Navayi Neya　　J. Vaseghi Amiri　　M. Alijani Ardeshir

Abstract *This paper concentrates on the presentation of a closed form solution of dam-reservoir interaction considering reservoir viscosity and bottom absorption under harmonic excitations. For this purpose, the governing equations of dam-reservoir are solved in the frequency domain and using the obtained frequency response function, the effects of different parameters are considered on dam or hydrodynamic pressure response. The results show that consideration of reservoir viscosity creates an imaginary term and the responses depend on values of viscosity, bottom absorption, exited period and dam-reservoir period.*

Key words Closed form Solution, Fluid Viscosity, Concrete Gravity Dam, Hydrodynamic Pressure, Dam Reservoir Interaction.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۱۰/۲ و تاریخ پذیرش آن ۹۵/۹/۲۸ می‌باشد.

(۱) کارشناس ارشد سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل.

(۲) نویسندهٔ مسئول، دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل.　　Email: Navayi@nit.ac.ir

(۳) استاد، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل.

(٤) فارغ التحصیل دکترای سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل.

مقدمه

طی چند دههٔ گذشته، سدهای بتنی زیادی در مناطق زلزله‌خیز ساخته شده است و انتظار می‌رود که تعداد زیادتری نیز در آینده ساخته شوند. این سدها دیر یا زود علاوه‌بر بارهای بهره‌برداری درمعرض زمین‌لرزه‌های شدید نیز قرار خواهند گرفت؛ لذا ارزیابی لرزه‌ای و تأمین مقامت لازم دربرابر نیروهای زلزله برای چنین سازه‌هایی اجتناب‌ناپذیر می‌نماید.

در ارزیابی لرزه‌ای سدهای بتنی، فشار هیدرودینامیک ناشی از وجود سیال مرتعش در مخزن سدها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و مقادیر آن بر وجه بالادست سدها عمدتاً تابعی از عوامل مختلف نظیر شتاب زمین، شتاب بدنهٔ سد، ارتفاع و نیز خواص فیزیکی و مکانیکی سد و مخزن می‌باشد، که به‌این‌ترتیب دستگاه معادلات دینامیکی حاکم بر حرکت سد و مخزن مستقل از یکدیگر نیست و اصطلاحاً کوپله می‌باشند.

در حل معادلات دینامیکی حاکم بر سیستم سد– مخزن پارامترهای زیادی تأثیرگذار می‌باشند که محققان بااستفاده از روش‌های مختلف تحلیلی یا عددی به بررسی تعدادی از این پارامترها پرداختند. در این میان و برای نخستین‌بار حل معادلهٔ موج دوبعدی حاکم بر محیط مخزن در سدهای بتنی وزنی به‌منظور تعیین فشار هیدرودینامیک مؤثر بر وجه بالادست سد تحت اثر شتاب تحریک هارمونیک افقی توسط وسترگارد در سال ۱۹۳۳ ارائه گردید [1]. سپس کوتسوبو نشان داد پاسخ وسترگارد تنها هنگامی‌که پریود تحریک، بزرگ‌تر از پریود طبیعی مخزن باشد، معتبر است [2]. زنگار فشار هیدرودینامیک را برای شکل‌های مختلف وجه بالادست سازه با فرض تراکم‌ناپذیری آب به‌روش شبیه‌سازی الکتریکی به‌دست آورد [3]. بوستامانته و همکاران اثر طول مخزن را برای بازهٔ پریود تحریک عریض‌تر از بازه‌های قبلی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که برای پریودهای تحریک بزرگ‌تر از پریود طبیعی مخزن، اثر طول مخزن ناچیز است ولی برای پریودهای کوتاه‌تر، طول مدل‌شدهٔ مخزن نقش مهمی در حرکت هارمونیک بازی می‌کند. وی همچنین اثر امواج سطحی را برای تحریک هارمونیک بررسی نمود و خطای نادیده گرفتن امواج سطحی را به‌دست آورد [4]. چوپرا در سال ۱۹٦۷ فشار هیدرو دینامیک وارد بر سدهای با وجه بالادست قائم و صلب را برای شتاب تحریک افقی و قائم در محدودهٔ فرکانس تعیین کرد و ضمن برطرف نمودن محدودیت پاسخ وسترگارد نشان داد که تأثیر امواج سطحی ناچیز ولی تراکم‌پذیری سیال مهم می‌باشد [5]. وی همچنین در ۱۹۷۰ پاسخ سد تحت اثر شتاب زلزلهٔ افقی زمین با مقدار دل‌خواه را با درنظر گرفتن اثر تراکم‌پذیری سیال و انعطاف‌پذیری سد ارائه نمود [6].

چاکرابارتی و چوپرا فشار هیدرودینامیک را در مخزن سد در اثر مؤلفهٔ شتاب قائم زلزله به‌روش تحلیلی به‌دست آوردند و نشان دادند که این فشار به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای به ضریب ارتجاعی مصالح سد وابسته است [7]. چاونگ پاسخ‌های تحلیلی برای سد صلب با وجه بالادست و کف مخزن شیب‌دار را برای مخزن با طول محدود و با نادیده‌گرفتن اثر تراکم‌پذیری سیال به دست آورد [8].

برخی محققان نیز به حل مسئلهٔ اندرکنش سد و مخزن در حوزهٔ زمان پرداختند. تسای و همکاران بااستفاده از ترکیب دو روش اجزای محدود و روش تحلیلی، پاسخ نیمه‌تحلیلی سیستم سد– مخزن را در حوزهٔ زمان یافتند [9-11]. عطارنژاد و فرساد پاسخ دقیق سیستم سد– مخزن را در حوزهٔ زمانی برای سد با ضخامت متغیر موردبررسی قرار دادند و با درنظر گرفتن اندرکنش سازه و سیال، پاسخ‌ها را برای سد با مخزن خالی و پر برای چند زلزله ارائه نمودند [12].

اولین بررسی‌ها در مورد جذب امواج فشاری در اثر رسوبات کف مخزن توسط فنوس و چوپرا صورت گرفت و نشان داده شد که رسوبات موجود در کف مخزن نقش مهمی در برآورد درست فشار هیدرودینامیکی مؤثر بر سد ایفا می کند [13]. بوانانی و همکاران پاسخ نیمه‌تحلیلی را با درنظر گرفتن اثر جذب

کف مخزن در حالت شتاب افقی زلزله ارائه نمودند [14]. زینگالس فشار هیدرودینامیک موثر بر سد را با معادل‌سازی اثر لزجت سیال به شکل میرایی تعیین نمود [15]. نوایی‌نیا و علیجانی اردشیر نیز پاسخ فشار هیدرودینامیک مخازن سدهای بتنی را بااحتساب لزجت سیال تحت شتاب تحریک افقی و قائم در محدودهٔ فرکانس بدون لحاظ نمودن اثر اندرکنش سد و مخزن بااحتساب اثر جذب کف با حل معادلهٔ دیفرانسیل حاکم بر مخزن و اعمال شرایط مرزی به‌طور دقیق به‌دست آوردند [16].

هدف از این تحقیق ارائهٔ روشی تحلیلی برای تعیین پاسخ تغییرمکان سدهای بتنی وزنی بااحتساب لزجت سیال مخزن، اندرکنش سد و مخزن و جذب امواج هیدرودینامیک توسط کف مخزن تحت شتاب تحریک افقی و قائم می‌باشد.

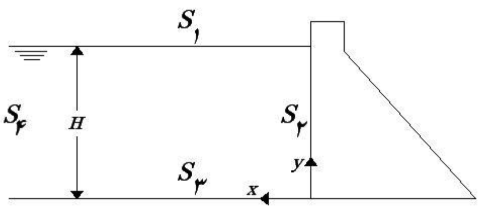
معادلات حاکم

معادلهٔ حاکم بر مخزن. معادلهٔ حاکم بر محیط مخزن سدهای بتنی بااستفاده از روابط ناویر استوکس، رابطهٔ پیوستگی و قانون لزجت استوکس به‌شکل زیر درمی‌آید [15-19].

$$\nabla^2 P + \frac{4}{3}\frac{\mu}{K}\frac{\partial}{\partial t}(\nabla^2 P) = \frac{1}{C^2}\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \qquad (۱)$$

که در آن P فشار هیدرودینامیک، μ لزجت، K مدول بالک، C سرعت امواج حجمی و t متغیر زمان می‌باشد. در به‌دست آوردن معادلهٔ فوق فرض شده است که سیال همگن، هموژن با رفتار خطی و حرکت آن غیرپیچشی و با دامنهٔ کم است و جملات شتاب انتقالی سیال در روابط ناویر استوکس کوچک می‌باشد [19]. برای سدهای بتنی وزنی معادلات حاکم به حالت دوبعدی قابل تقلیل می‌باشد [13] که درادامه باتوجه به شرایط مرزی، حل معادلهٔ فوق به‌صورت تحلیلی ارائه می‌گردد.

شرایط مرزی محیط سیال. چهار شرط مرزی محیط مخزن را که در شکل (۱) با مرزهای S_1 و S_2 و S_3 و S_4 نشان داده شده‌اند با این فرض که مؤلفهٔ افقی حرکت زمین عمود بر محور سد باشد و مخزن سد در امتداد بالادست تا بی‌نهایت ادامه یابد، به‌صورت زیر می‌توان بیان نمود.



شکل ۱ سیستم سد –مخزن و شرایط مرزی

شرط مرزی در سطح آزاد مخزن (S_1). به هنگام وقوع زلزله و به‌دلیل ارتعاشات سازه و مخزن، در سطح مخزن امواجی به‌وجود می‌آید که سطح مخزن را متلاطم می‌سازند. بنابراین در حالت کلی به‌دلیل وجود امواج سطحی ناشی از زلزله، فشار هیدرودینامیک در سطح آزاد مخزن صفر نمی‌باشد و شرط مرزی مربوط به آن را برای مرز (S_1) می‌توان به شکل زیر نشان داد [5].

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + g\frac{\partial P}{\partial y} = 0 \qquad (۲)$$

که در آن g شتاب گرانش می‌باشد. مطالعات بوتسامانته نشان می‌دهد که صرف‌نظر کردن از تأثیر امواج سطحی در مخازن سدها منجر به خطای زیادی در محاسبات نمی‌شود و معمولاً می‌توان با تقریب خوبی فشار در سطح آزاد مخزن را صفر درنظر گرفت [4].

شرط مرزی بین سد و مخزن (S_2). به‌منظور تأمین شرط عدم جدایی بین سد و مخزن، سیال در تماس دائمی با مرز جامد می‌باشد. بدین منظور بایستی مؤلفهٔ سرعت نرمال در هر نقطه از مرز جامد، برابر با سرعت

نرمال در مرز سیال باشد. با فرض سرعت کم سیال و درنتیجه ناچیز بودن تنش برشی در تماس با جسم سد در مرز مشترک شرط مرزی در فصل مشترک سد صلب و مخزن $\frac{\partial P}{\partial n}=-\rho\, a_n$ می‌باشد که در آن a_n شتاب وارد در یک نقطهٔ دل‌خواه از مرز و n بردار عمود بر نقطهٔ موردنظر در وجه بالادست سد می‌باشد [18,19, 20]. ازآنجایی‌که در مطالعهٔ حاضر بردار عمود بر مرز مشترک سد و مخزن در وجه بالادست سد به موازات محور x فرض می‌گردد درنتیجه شرط مرزی ($S_۲$) به‌شکل زیر درمی‌آید:

$$\frac{\partial P}{\partial x}=-\rho a_g^x(t)\delta_{xl} \qquad (۳)$$

که در آن δ_{xl} تابع دلتای کرنکر و $l=x,y$ می‌باشد.

برای درنظر گرفتن اثر اندرکنش سد و مخزن، شتاب تحریک وارد بر سیال در این مرز به‌صورت مجموع مؤلفهٔ افقی شتاب زلزله و شتاب ناشی از ارتعاشات سازه بیان می‌گردد [6,19,20]. لذا رابطهٔ (۳) به‌شکل رابطهٔ (٤) کامل خواهد شد.

$$\frac{\partial P}{\partial x}(0,y,t)=-\rho a_g^x(t)\delta_{xl}-\rho\varphi_j^x(0,y)\ddot{Y}_j^l(t) \qquad (٤)$$

که در آن $\varphi_j^x(0,y)$ تغییرمکان مود jام ارتعاش سد درجهت x و $\ddot{Y}_j(t)$ شتاب مود jام سازه می‌باشد.

شرط مرزی در کف مخزن ($S_۳$). اگر کف مخزن افقی و صلب فرض گردد، در این صورت شرط مرزی وقتی‌که فقط شتاب افقی اعمال گردد به‌شکل $\frac{\partial P}{\partial y}=0$ می‌باشد و به‌هنگام وارد شدن بار زلزله هیچ‌گونه تغییرشکلی در کف مخزن ایجاد نمی‌گردد و بار دینامیکی مستقیماً به سد انتقال می‌یابد [5,12,16]. اگر شتاب زلزله دارای مؤلفهٔ قائم باشد شرط مرزی در کف مخزن به‌شکل $\frac{\partial P}{\partial y}=-\rho a_y$ به‌دست می‌آید که در آن a_y مؤلفهٔ قائم شتاب زلزله می‌باشد [5,16,18, 19].

در اثر وجود رسوبات رودخانه‌ای در کف مخزن مقداری از انرژی زلزله جذب می‌گردد و درواقع به‌دلیل وجود این رسوبات کف مخزن کاملاً صلب نمی‌باشد که این موضوع نیز خود باعث تغییر در فرکانس طبیعی مخزن می‌گردد.. در این حالت شرط مرزی در کف مخزن به‌صورت $\frac{\partial P}{\partial y}(x,0,t)=q\frac{\partial P}{\partial t}(x,0,t)$ بیان می‌گردد که در آن $q=\frac{1}{C\beta}$ می‌باشد. β ضریبی است که به‌سرعت موج، میزان و نیز جنس رسوب کف مخزن بستگی دارد و مقدار آن می‌تواند بین ۱ (برای حالت جذب کامل امواج) تا بی‌نهایت (برای حالت انعکاس کامل امواج) تغییر نماید [13].

شرط مرزی در بالادست مخزن ($S_٤$). با دور شدن از سد به سمت بالادست مخزن، فشار هیدرودینامیک به‌تدریج مستهلک می‌شود و در بی‌نهایت به‌سمت صفر میل می‌کند لذا فشار در بالادست مخزن برابر صفر فرض می‌گردد.

معادلهٔ حاکم بر سد

روش آنالیز مودال در دینامیک سازه‌های چند درجه آزادی، روشی سودمند برای محاسبهٔ تغییرمکان سد با درنظر گرفتن چند مود ارتعاش می‌باشد. براساس مبانی آنالیز مودال برای سازه‌های چند درجه آزادی برای تحریکی در راستای x یا y، تغییر مکان به‌صورت زیر می‌باشد [19]:

$$r_k^l(x,y,t)=\sum_{j=1}^{m}\varphi_j^k(x,y)\ Y_j^l(t),\ k=x,y;\ l=x,y \qquad (۵)$$

که در آن $r_x^l(x,y,t)$ و $r_y^l(x,y,t)$ به‌ترتیب تغییرمکان افقی و قائم مود j ام ارتعاش سد نسبت به پایهٔ سد، m تعداد مودهای موردنظر، $\varphi_j^x(x,y)$ و $\varphi_j^y(x,y)$ به‌ترتیب مقادیر تغییرمکان افقی و قائم برای مود j ام ارتعاش سد بر بستر صلب با مخزن خالی و $Y_j^l(t)$ مختصات مودی مرتبط با این مودهای ارتعاشی می‌باشند.

بااستفاده از روش آنالیز مودال، معادلهٔ دینامیکی حاکم بر حرکت سد تحت شتاب زمین برای مود j ام ارتعاشی‌به صورت معادلهٔ زیر حاصل می‌گردد [20].

$$M_j[\ddot{Y}_j^1(t)+2\xi_j\omega_j\dot{Y}_j^1(t)+\omega_j^2Y_j^1(t)]= \\ -L_j^1a_g^1(t)+\int_0^H p^1(0,y,t)\,\varphi_j^x(0,y)dy \quad (٦)$$

کـه در آن ξ_j نسـبت میرایـی بحرانـی مـود j ام سد، ω_j فرکانس طبیعـی ارتعـاش مـود j ام سـد خـالی روی پی صلب، $p^1(0,y,t)$ فشـار هیـدرودینامیک مـؤثر بر وجه بالادست سد و H نیز ارتفاع سد مـی‌باشـد. M_j جرم تعمیم‌یافتهٔ مود jام ارتعاش سد است و بـه‌صـورت زیر می‌باشد [17].

$$M_j=\iint_A m(x,y)\{[\varphi_j^x(x,y)]^2+[\varphi_j^y(x,y)]^2\}\,dx\,dy \quad (٧)$$

در این رابطـه $m(x,y)$ چگـالی جـرم مـی‌باشـد و انتگرال نیز برروی سـطح مقطـع عرضـی سـد تعریـف می‌شود. L_j^1 نیز به‌صورت زیر تعریف می‌گردد [17].

$$L_j^1=\iint_A m(x,y)\varphi_j^1(x,y)\,dx\,dy \quad (٨)$$

پاسخ به تحریک هارمونیک زمین

پاسخ سیستم سد-مخـزن بـه شـتاب هارمونیـک زمـین ($e^{i\omega t}$) به‌صورت تابع پاسخ فرکانس مخـتلط قابـل بیـان می‌باشد که در آن ω فرکـانس تحریـک مـی‌باشـد[17]. برایناساس مختصـات مـودی و فشـار هیـدرودینامیک مخزن به‌صورت زیر می‌باشد.

$$Y_j^1(t)=\overline{Y}_j^1(\omega)e^{i\omega t} \quad (٩)$$

$$p^1(x,y,t)=\overline{p}^1(x,y,\omega)e^{i\omega t} \quad (١٠)$$

با جای‌گذاری رابطهٔ (۹) در (٦)، معادلهٔ حـاکم بـر حرکت سد برای مود j ام ارتعاشی را می‌توان برحسـب توابع پاسخ فرکانس مختلط بازنویسی نمود [19].

$$M_j[-\omega^2+i(2\xi_j\omega_j\omega)+\omega_j^2]\overline{Y}_j^1(\omega)= \\ -L_j^1+\int_0^H \overline{p}^1(0,y,\omega)\,\varphi_j^x(0,y)dy \quad (١١)$$

معادلهٔ حاکم بر محیط مخزن نیز به فرم تابع پاسـخ فرکانس مختلط با جای‌گذاری (۱۰) در (۱) بـه‌صـورت رابطهٔ زیر قابل‌بیان می‌باشد [18].

$$\nabla^2\overline{p}+s^2\overline{p}=0 \quad (١٢)$$

که در آن s به‌صورت رابطهٔ (۱۳) قابل تعریف می‌باشد.

$$s^2=\frac{\omega^2/C^2}{1+\frac{4\mu}{3K}i\omega} \quad (١٣)$$

به‌علت خطی‌بودن معادلات حاکم و شرایط مـرزی مسئله، بااستفاده از اصـل جمـع آثـار قـوا پاسخ فشـار هیـدرودینامیک سیسـتم سـد-مخـزن تحـت شـتاب هارمونیک زمین برای ارتعاش سد در مودهای مختلـف، به‌صورت زیر بیان می‌گردد.

$$\overline{p}^1(x,y,\omega)=\overline{p}_0^1(x,y,\omega)+\sum_{j=1}^{m}\overline{p}_j(x,y,\omega)\,\overline{Y}_j^1(\omega) \quad (١٤)$$

که عبارت اول معرف فشار هیـدرودینامیک بـرای حرکت صلب سد و جملات بعدی فشار هیدرودینامیک ناشی از مودهای ارتعاشی سد انعطاف‌پذیر می‌باشد.

معادلات (۱۱) و (۱۲) معادلات حـاکم بـر محـیط سازه و مخزن تحـت تحریـک هارمونیـک مـی‌باشـند و به‌کمک شرایط مرزی بایـد حـل گردنـد. برایناسـاس، شرایط مرزی مسئله بـرای تـابع پاسخ فرکانسـی فشـار هیدرودینامیک به‌شکل زیر تبدیل می‌شود.

الف) وقتی تحریک، افقی و سد صلب باشد.

$$\begin{cases} \frac{\partial\overline{P}_0^x}{\partial x}(0,y,\omega)=-\rho \\ \frac{\partial\overline{P}_0^x}{\partial y}(x,0,\omega)=i\omega q\,\overline{P}_0^x(x,0,\omega) \\ \overline{P}_0^x(x,H,\omega)=0 \\ \overline{P}_0^x(\infty,y,\omega)=0 \end{cases} \quad (١٥)$$

ب) وقتی تحریک، قائم و سد صلب باشد.

$$\begin{cases} \frac{\partial\overline{P}_0^y}{\partial x}(0,y,\omega)=0 \\ \frac{\partial\overline{P}_0^y}{\partial y}(x,0,\omega)=-\rho+i\omega q\,\overline{P}_0^y(x,0,\omega) \\ \overline{P}_0^y(x,H,\omega)=0 \\ \overline{P}_0^x(\infty,y,\omega)=0 \end{cases} \quad (١٦)$$

پ) وقتی تحریک، شتاب افقی ناشی از ارتعاش سد در مود ارتعاشی خود باشد.

$$\begin{cases} \frac{\partial \overline{P}_j}{\partial x}(0,y,\omega) = -\rho\varphi_j^x(0,y) \\ \frac{\partial \overline{P}_j}{\partial y}(x,0,\omega) = i\omega q\,\overline{P}_j(x,0,\omega) \\ \overline{P}_j(x,H,\omega) = 0 \\ \overline{P}_0^x(\infty,y,\omega) = 0 \end{cases} \quad (۱۷)$$

بەمنظور حل معادلهٔ حاکم بر سیستم سد–مخزن با درنظر گرفتن اثر اندرکنش سد و مخزن در حوزهٔ فرکانس باتوجه به این واقعیت که پاسخ سازه‌های پریود کوتاه نظیر سدهای بتنی وزنی تحت اثر زلزله اصولاً به‌شکل مود اول ارتعاشی آنها می‌باشد [13]، بدین جهت برای منظور نمودن اثر اندرکنش، با کمی تقریب می‌توان فرض نمود که دیوارهٔ سد انعطاف‌پذیر تحت شتاب تحریک به‌شکل مود اصلی خود که برای سدهای بتنی وزنی مود اول می‌باشد ارتعاش می‌کند. برای این منظور کافی است در روابط ارائه‌شده به‌ازای j مقدار ۱ قرار داده شود. بدیهی است چنانچه j=0 درنظر گرفته شود فقط حرکت صلب سد مدنظر قرار می‌گیرد.

حل معادلات حاکم

پاسخ به تحریک افقی. معادلهٔ دیفرانسیل حاکم بر مخزن در محدودهٔ فرکانس، معادلهٔ (۱۲)، به‌همراه یکی از شرایط مرزی (۱۵) الی (۱۷) یک مسئلهٔ اشتورم لیویل را تشکیل می‌دهند. پاسخ معادله دیفرانسیل (۱۲) بااستفاده‌از روش جداسازی متغیرها و اعمال شرط مرزی انتشار در بالادست مخزن، سطح آزاد و نیز کف مخزن مقدار ویژه λ_n و $\overline{p}(x,y,t)$ به‌شکل معادلات (۱۸) و (۱۹) به‌دست می‌آیند.

$$e^{2i\lambda_n H} = -\frac{\lambda_n - \omega q}{\lambda_n + \omega q} \quad (۱۸)$$

$$\overline{p}(x,y,t) = \sum_{n=1}^{\infty} G_n(\omega) e^{k_n x} \left[e^{i\lambda_n y} + \frac{\lambda_n - \omega q}{\lambda_n + \omega q} e^{-i\lambda_n y}\right] \quad (۱۹)$$

که برای n حالت مختلف از λ می‌توان به n جواب ممکن دست یافت [19]. G_n ضریبی است که با اعمال شرط مرزی بین سد و مخزن، تعیین می‌شود و به‌کمک آن پاسخ فشار هیدرودینامیک در محدودهٔ فرکانس وقتی تحریک افقی و سد صلب است به شکل زیر به‌دست می‌آید.

$$\overline{p}_0^x(x,y,\omega) = -2\rho H \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda_n^2}{[(\lambda_n^2 - (\omega q)^2)H + i\omega q]} \frac{I_{0n}}{\sqrt{\lambda_n^2 - s^2}} \gamma_n(y,\omega) e^{k_n x} \quad (۲۰)$$

که در آن I_{0n} و تابع متعامد $\gamma_n(y,\omega)$ به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند.

$$\gamma_n(y,\omega) = \frac{1}{2\lambda_n}[(\lambda_n + \omega q)e^{i\lambda_n y} + (\lambda_n - \omega q)e^{-i\lambda_n y}] \quad (۲۱)$$

$$I_{0n}(\omega) = \frac{1}{H}\int_0^H \gamma_n(y,\omega)\,dy \quad (۲۲)$$

و به‌طور مشابه پاسخ فشار هیدرودینامیک در محدودهٔ فرکانس وقتی تحریک افقی ناشی از ارتعاش سد در مود ارتعاشی خود به‌صورت زیر می‌باشد.

$$\overline{p}_j(x,y,\omega) = -2\rho H \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda_n^2}{[(\lambda_n^2 - (\omega q)^2)H + i\omega q]} \frac{I_{jn}}{\sqrt{\lambda_n^2 - s^2}} \gamma_n(y,\omega) e^{k_n x} \quad (۲۳)$$

که در آن I_{jn} به‌صورت زیر می‌باشد.

$$I_{jn}(\omega) = \frac{1}{H}\int_0^H \gamma_n(y,\omega)\,\varphi_j^x(0,y)\,dy \quad (۲٤)$$

رابطهٔ (۲۳) پاسخ فشار هیدرودینامیک مخزن در محدودهٔ فرکانس تحت شتاب افقی زمین و با درنظر گرفتن اثر جذب کف می‌باشد. برای بررسی صحت محاسبات، با فرض صلب بودن کف مخزن و ناچیز بودن لزجت سیال و برای مود اول ارتعاشی سد، پاسخ

به‌دست آمده کاملاً بر پاسخ چوپرا [6,18] منطبق است.

اکنون با مشخص‌شدن پاسخ فرکانسی فشار هیدرودینامیک و با جای‌گذاری در معادلهٔ حرکت سد، پاسخ سد در محدودهٔ فرکانس به‌دست می‌آید.

$$M_j[-\omega^2 + i(2\xi_j\omega_j\omega) + \omega_j^2]\bar{Y}_j^x(\omega) = -L_j^x + \int_0^H [\bar{p}_0^x(0,y,\omega) + \bar{p}_j(0,y,\omega)\,\ddot{\bar{Y}}_j^x(\omega)]\,\varphi_j^x(0,y)dy \qquad (۲۵)$$

$$\bar{Y}_j^x(\omega) = -[L_j^x + B_0^x(\omega)]/ -\omega^2\{M_j + \mathrm{Re}[B_1(\omega)]\} + i\omega\{i2\xi_j\omega_j\omega - \omega\,\mathrm{Im}[B_1(\omega)]\} + \omega_j^2 M_j \qquad (۲۶)$$

که در آن

$$B_0^x(\omega) = -\int_0^H \bar{p}_0^x(0,y,\omega)\;\varphi_j^x(0,y)dy \qquad (۲۷)$$

$$B_1(\omega) = -\int_0^H \bar{p}_j(0,y,\omega)\,\varphi_j^x(0,y)dy \qquad (۲۸)$$

رابطهٔ (۲۶) پاسخ سد در محدودهٔ فرکانس تحت شتاب افقی زمین و بالحاظ اثر جذب کف می‌باشد. برای بررسی صحت محاسبات بافرض صلب‌بودن کف مخزن، پاسخ فشار هیدرودینامیکی سیال، بر پاسخ چوپرا منطبق می‌گردد و درنتیجه پاسخ دینامیکی سد نیز در مود ارتعاشی اول سد بر پاسخ چوپرا [13] انطباق کامل دارد که نشان‌دهندهٔ صحت محاسبات فوق است.

پاسخ به تحریک قائم

برای یافتن پاسخ فرکانسی فشار هیدرودینامیک وقتی تحریک قائم و سد صلب است، نظیر آنچه در قسمت قبل بیان گردید، بااستفاده از روش جداسازی متغیرها و با اعمال شرایط مرزی مسئله پاسخ فشار هیدرودینامیکی سیال مخزن در محدودهٔ فرکانس به‌دست می‌آید.

$$\bar{p}_0^y(0,y,\omega) = \frac{-\rho\sin|s|(H-y)}{i\omega q\sin|s|H + |s|\cos|s|H)} \qquad (۲۹)$$

برای بررسی صحت محاسبات با ناچیز فرض‌کردن لزجت سیال و به‌دلیل اینکه ω همیشه بزرگ‌تر از صفر می‌باشد می‌توان $|s|$ را به $\frac{\omega}{C}$ تبدیل کرد، درنتیجه،

$$\bar{p}_0^y(0,y,\omega) = \frac{-\rho C}{\omega}\,\frac{\sin\frac{\omega}{C}(H-y)}{i\omega C\sin\frac{\omega}{C}H + \frac{\omega}{C}\cos\frac{\omega}{C}H)} \qquad (۳۰)$$

که با پاسخ چوپرا [13,18] مطابقت کامل دارد.

با به‌دست آوردن پاسخ فرکانسی فشار هیدرودینامیک و با جای‌گذاری در معادلهٔ حرکت سد، پاسخ سد در محدودهٔ فرکانس به‌دست می‌آید.

$$M_j[-\omega^2 + i(2\xi_j\omega_j\omega) + \omega_j^2]\bar{Y}_j^y(\omega) = -L_j^y + \int_0^H [\bar{p}_0^y(0,y,\omega) + \bar{p}_j(0,y,\omega)\,\ddot{\bar{Y}}_j^y(\omega)]\,\varphi_j^x(0,y)dy \qquad (۳۱)$$

$$\bar{Y}_j^y(\omega) = -[L_j^y + B_0^y(\omega)]/ -\omega^2\{M_j + \mathrm{Re}[B_1(\omega)]\} + i\omega\{i2\xi_j\omega_j\omega - \omega\,\mathrm{Im}[B_1(\omega)]\} + \omega_j^2 M_j \qquad (۳۲)$$

$$B_0^y(\omega) = -\int_0^H \bar{p}_0^y(0,y,\omega)\;\varphi_j^x(0,y)dy \qquad (۳۳)$$

$$B_1(\omega) = -\int_0^H \bar{p}_j(0,y,\omega)\,\varphi_j^x(0,y)dy \qquad (۳٤)$$

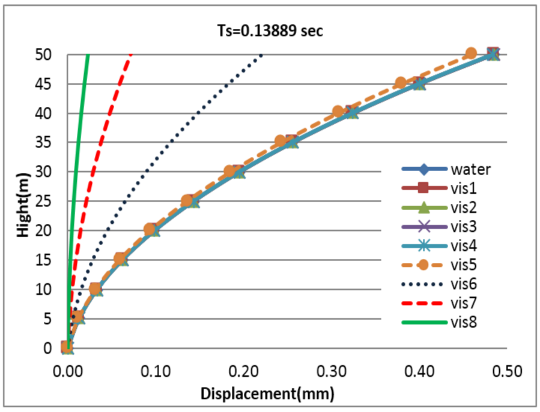
رابطهٔ (۳۲) پاسخ سد در محدودهٔ فرکانس تحت شتاب قائم زمین و بالحاظ اثر جذب کف می‌باشد. برای بررسی صحت محاسبات چنانچه لزجت سیال ناچیز فرض گردد، پاسخ فشار هیدرودینامیکی سیال منطبق بر پاسخ چوپرا می‌گردد و درنتیجه پاسخ دینامیکی سد نیز در مود ارتعاشی اول سد بر پاسخ چوپرا [13, 21] انطباق کامل دارد که نشان‌دهندهٔ صحت محاسبات فوق است.

نتایج

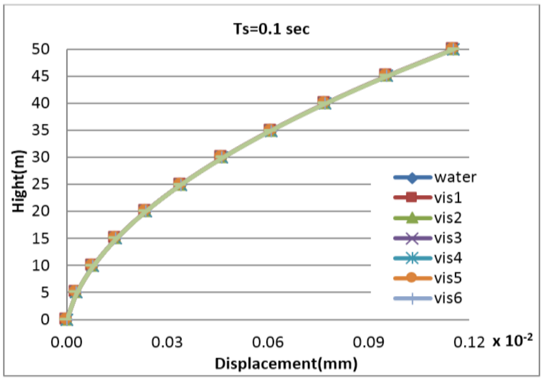
کف مخزن صلب. به‌منظور ارائهٔ نتایج عددی، یک سد به‌شکل مثلث قائم‌الزاویه به‌ارتفاع ۵۰ متر که برابر ارتفاع

مخزن می‌باشد مـدنظر قـرار گرفتـه اسـت. لزجـت آب مخزن که با water نشان داده می‌شود برای حـرارت ۱۵ درجـهٔ سـانتی‌گـراد، مـدول بالـک آب، K برابـر MPa ۲۰۷۰٫۷، مدول الاستیسیته و نیز ضریب پواسون مصالح سد نیز بـه‌ترتیـب برابـر MPa ۲۰۰۰۰٫۰ و ۰/۲ انتخـاب گردیده است. برای حالت بدون اثر جذب کف، حداکثر پاسخ تغییرمکان وجه بالادسـت سـد بـا درنظر گـرفتن انعطـاف‌پـذیری سـد در مـود اول ارتعـاش آن بـه‌ازای مقـادیر مختلـف لزجـت سیـال مخـزن شـامل water (لزجـت آب ۱۵ درجـه سـانتیگراد) و vis1 تـا vis8 به‌ترتیب سیالی با لزجـت ۱۰ تـا 10^8 برابـر لزجـت آب برای سه تحریک متفاوت ω که عبارتنـد از تحریـک بـا پریود مساوی، کمتر و بیشتر از پریود طبیعی مخـزن در شکل (۲) مقایسه شـده‌انـد کـه در آن T_s معـرف پریـد تحریک می‌باشد.

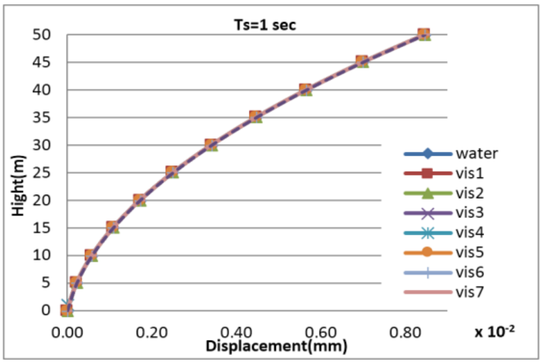
پریـــود تشـــدید بـــرای ســـد صـــلب و مخـــزن غیرلزج، T_{Res}، وقتی اتفاق می‌افتد که پاسخ فشار هیـدرو دینامیک بینهایت گـردد کـه در چنین حـالتی برابـر بـا $T_{Res}=\dfrac{4H}{nC}$ خواهد شد که با جایگذاری مقادیر عـددی برای سد با ارتفاع ۵۰ متر و مخـزن پـر، پریـود تشـدید مخـزن غیرلـزج برابـر بـا $T_{Res}=0.13888\ \text{sec}$ مـی‌گردد[16, 18]. از طرف دیگر پریود طبیعی مخـزن لـزج برابر $T_{Res}=-0.000015\ i\ \pm 0.138889$ بدست می‌آیـد که با نتایج مراجع [16, 18] یکی می‌باشد



(الف)



(ب)



(پ)

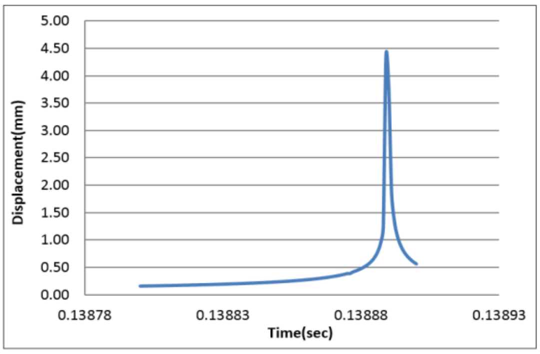
شکل ۲ تغییرمکان وجه بالادست سد به‌ازای سه پریود تحریک مختلف

همان‌طـوری کـه از شـکل (۲) پیداسـت مقـادیر مختلف لزجت در پریود تحریک کمتر و بیشتر از پریود طبیعی مخزن بر پاسخ تغییرمکان سازه تقریباً بی‌تأثیرنـد، اما در پریود تحریک مساوی بـا پریـود طبیعـی مخـزن، همان‌طور که در شکل (۲-الف) نشان داده شـده اسـت، لزجت بسته به مقدار آن تأثیر قابل‌توجهی روی پاسخ‌هـا دارد.

همچنین از آنجا که برای محاسبهٔ پریـود تشـدید بااحتساب اثـر انـدرکنش روش تحلیلـی وجـود نـدارد، نمودار پاسخ تغییرمکان تـاج سـدی بـه ارتفـاع ۵۰ متـر به‌ازای پریودهای تحریک مختلف برای سـیال بـا دمـای ۱۵ درجهٔ سانتی‌گراد و لزجتی معـادل ۱۰ برابـر لزجـت آب با درنظر گرفتن اثـر انـدرکنش در شـکل (۳) ارائـه

گردیده است.

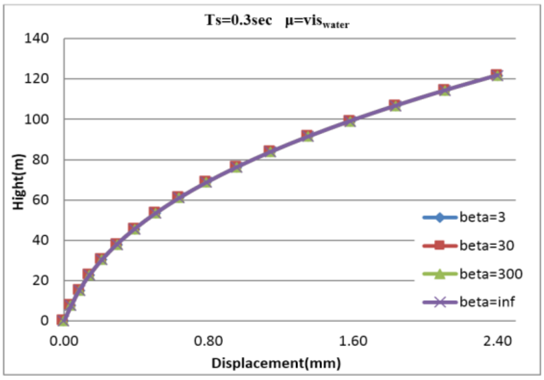
ملاحظه می‌شود که تشدید در پاسخ‌های سیستم سد-مخزن با سد انعطاف‌پذیر در پریودی بسیار نزدیک به پریود تشدید اصلی مخزن با سد صلب را نتیجه می‌دهد. بنابراین می‌توان با تقریب نسبتاً خوبی پریود تشدید سیستم سد-مخزن با سد انعطاف‌پذیر را با پریود تشدید مخزن در حالتی که سد صلب است برابر قرار داد.



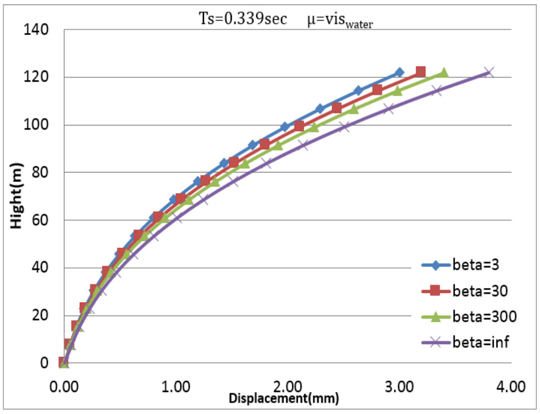
شکل ۳ تغییرمکان تاج سد به‌ازای پریودهای تحریک مختلف

اثر جذب کف

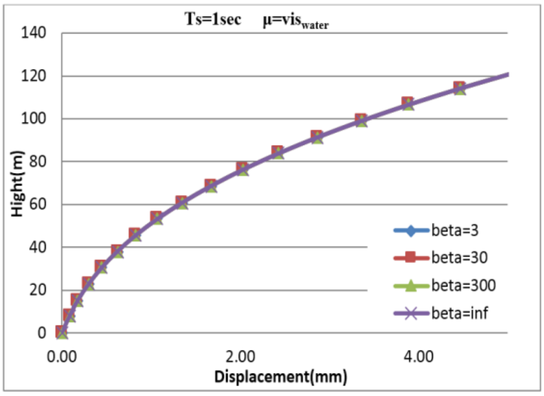
تحریک افقی. در شکل (٤) اثر جذب کف بر حداکثر پاسخ‌ها در حالت تحریک افقی، برای سیال با لزجت آب و در پریود تحریک برابر، کمتر و بیشتر از پریود طبیعی مخزن نشان داده شده است. در این شکل‌ها $\mu = vis_{water}$ معرف سیال با لزجتی برابر لزجت آب می‌باشد.



(الف)



(ب)



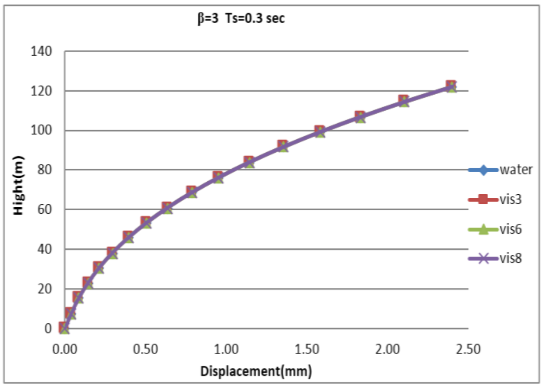
(پ)

شکل ٤ تغییرمکان سد در ارتفاع برای مقادیر مختلف لزجت سیال به‌ازای مقادیر مختلف T_s و $\mu=vis_{water}$

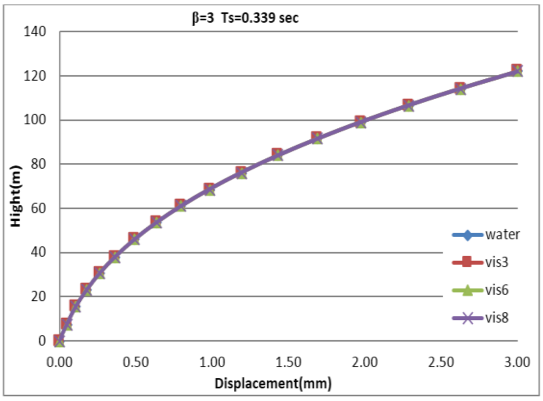
شکل (٤) نشان می‌دهد در تحریک افقی سیستم سد-مخزن، به‌ازای مقادیر مختلف β و لزجت سیال برابر لزجت آب، جذب کف در پریود تحریک کمتر و یا بیشتر از پریود تشدید مخزن تأثیری روی پاسخ‌ها ندارد و فقط به‌ازای تحریکی برابر با پریود تشدید مخزن مقادیر پاسخ‌ها تحت تأثیر قرار می‌گیرند. این تأثیر به‌گونه‌ای است که باافزایش β تغییرمکان‌ها بزرگ‌تر می‌شوند.

در شکل‌های (٥) و (٦) مقادیر حداکثر پاسخ‌های سد تحت شتاب هارمونیک افقی برای مود اول به‌ازای مقادیر مختلف لزجت سیال، در پریودهای مختلف

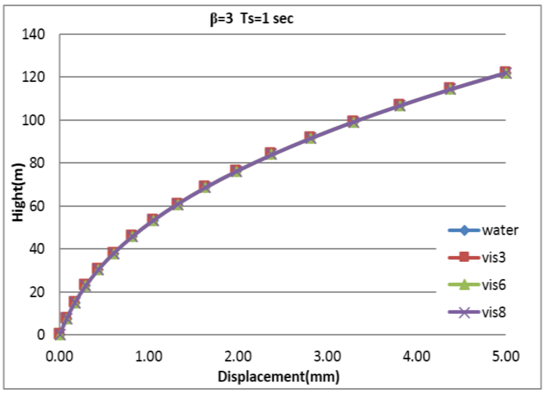
تحریک و برای دو مقدار متفاوت از β مقایسه شده است.



(الف)

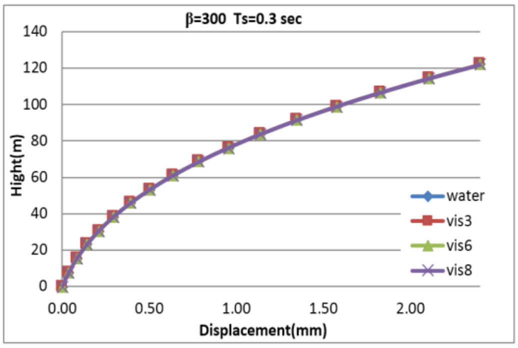


(ب)

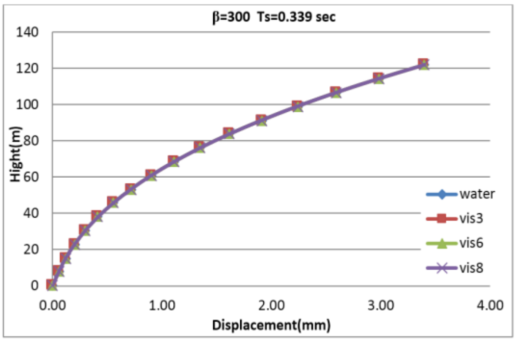


(پ)

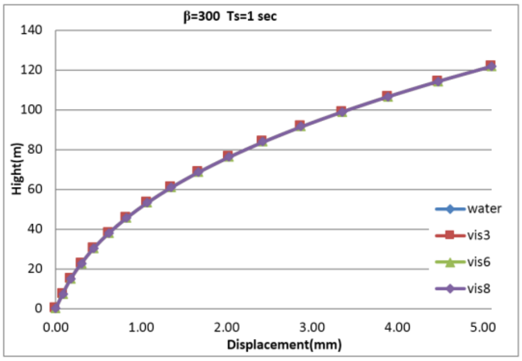
شکل ٥ تغییرمکان سد در ارتفاع برای مقادیر مختلف لزجت سیال به‌ازای مقادیر مختلف T_s و β=3



(الف)



(ب)



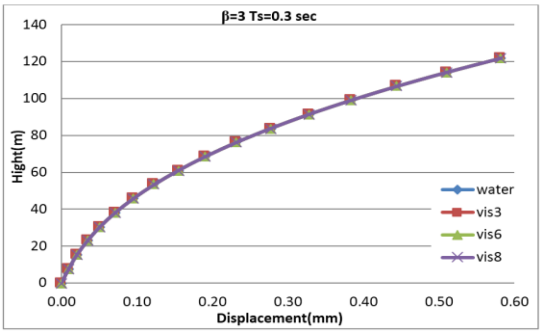
(پ)

شکل ٦ تغییرمکان سد در ارتفاع برای مقادیر مختلف لزجت سیال به‌ازای مقادیر مختلف Ts و β=300

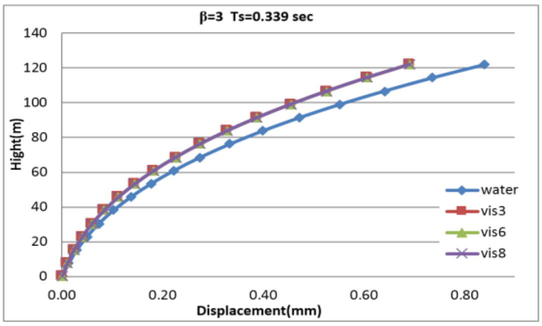
از شکل‌های (٥) و (٦) می‌توان نتیجه گرفت که در تحریک افقی سیستم سد-مخزن و به‌ازای مقادیر مختلف β، تأثیر همزمان اثر جذب کف و لزجت سیال اثر کاهنده نسبت به‌هم دارند درحالی‌که در پریود تحریک برابر، کمتر و بیشتر از پریود تشدید مخزن،

تغییرات لزجت سیال و اثـر جـذب کـف تـأثیری روی پاسخ‌ها نمی‌گذارند لذا می‌تـوان نتیجـه گرفـت کـه اثـر جذب کـف باعـث از بـین رفـتن تـأثیر لزجـت سـیال می‌گردد.

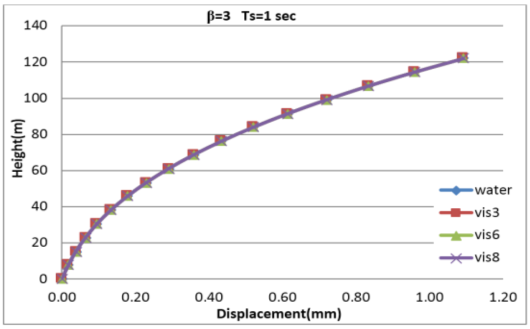
تحریک قائم. در شکل‌های (۷) و (۸) نیـز پاسـخ‌هـای سیال لزج تحت شتاب قائم برای مود اول بـرای مقـادیر مختلف لزجت سیال در پریودهای مختلـف تحریـک و برای دو مقدار متفاوت از β مقایسه شده است.



(الف)

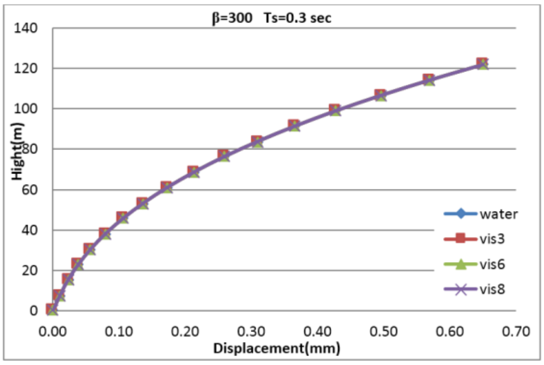


(ب)

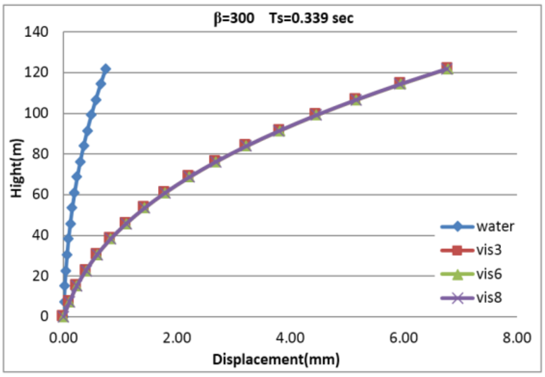


(پ)

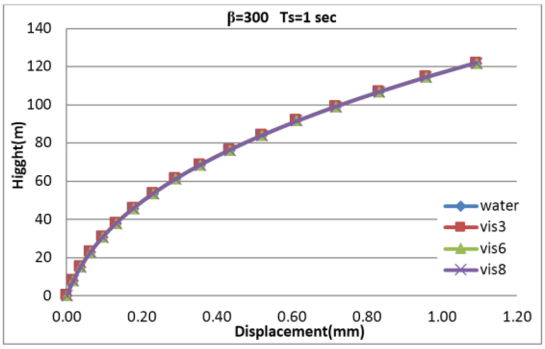
شکل ۷ تغییرمکان سد در ارتفاع برای مقادیر مختلف لزجت سیال به‌ازای مقادیر مختلف T_s و β=3



(الف)



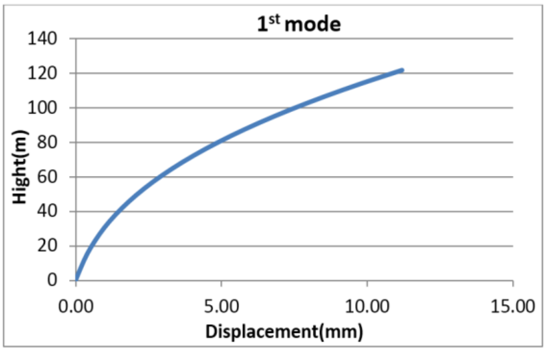
(ب)



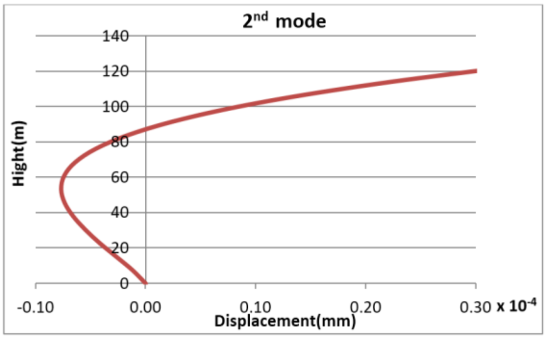
(پ)

شکل ۸ تغییرمکان سد در ارتفاع برای مقادیر مختلف لزجت سیال به‌ازای مقادیر مختلف T_s و β=300

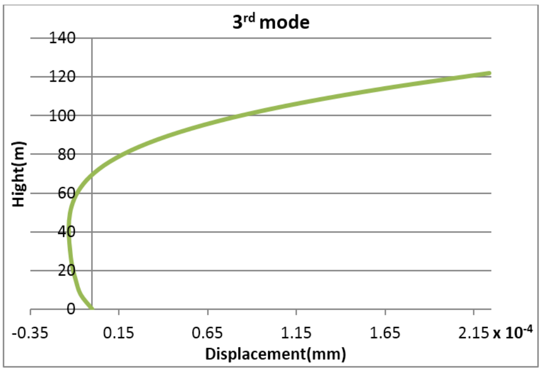
در شکل (۹) تغییرمکـان وجـه بالادسـت سـد در مودهای مختلف سازه با یکدیگر مقایسه گردیده‌انـد کـه نشان می‌دهند که با ترکیب مودهای مختلف سازه نتـایج به نتایج مود اول نزدیک می‌باشد یعنی مود اول ارتعاشی مود حاکم می‌باشد.



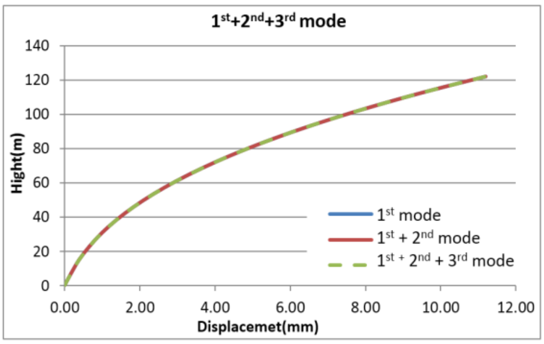
(الف)



(ب)



(پ)



(ت)

شکل ۹ تغییرمکان وجه بالادست سد در مودهای مختلف سازه

نتایج

در این تحقیق باارائهٔ روش تحلیلی، پاسخ سدهای بتنی وزنی تحت بارهارمونیک و در محدودهٔ فرکانس ارائه گردید. کلیه تحلیل‌ها با فرض رفتار خطی مصالح سد و مخزن صورت گرفته‌است و معادلات حاکم بر محیط سد و مخزن که به‌ترتیب شامل معادلهٔ حرکت و معادلهٔ موج می‌باشد بااحتساب انعطاف‌پذیری سد و لزجت مخزن به‌صورت تحلیلی حل شد و نتایج زیر حاصل گردید.

۱. برای تحریک هارمونیک سیستم سد-مخزن با انعطاف‌پذیری جسم سد با وجه بالادست قائم و کف مخزن افقی بااحتساب لزجت مخزن، معادلهٔ دیفرانسیل حاکم به‌همراه شرایط مرزی حل دقیق دارد و می‌توان تابع پاسخ فرکانسی را به‌دست آورد.

۲. در سیستم سد-مخزن، لزجت تنها در پریودهای تحریک نزدیک به پریود طبیعی سیستم تأثیر قابل‌توجهی بر پاسخ‌ها خواهد داشت.

۳. با تجزیهٔ پاسخ فشار هیدرودینامیک به دو بخش حرکت صلب و انعطاف‌پذیر، هر یک از پاسخ‌ها تحت تأثیر لزجت قرار می‌گیرند، درحالی‌که در برآیند اثر لزجت به‌شدت ناچیز می‌گردد.

٤. تحریک سیستم سد-مخزن در پریود طبیعی منجر به تأثیر قابل‌توجه اثر لزجت بر پاسخ فشار هیدرودینامیک و پاسخ تغییرمکان سد می‌شود.

۵. برای تحریک افقی سیستم سد-مخزن، جذب انرژی توسط رسوبات کف مخزن سبب کاهش تأثیرگذاری اثر لزجت بر پاسخ‌ها درمقایسه با حالت بدون رسوب می‌گردد.

٦. در تحریک قائم، درصورت وجود جذب انرژی توسط رسوب کف مخزن لزجت سیال مخزن به‌شدت بر پاسخ تغییرمکان سد تأثیرگذر می‌باشد، به‌طوری‌که با کاهش مقدار جذب انرژی کف، افزایش لزجت منجر به افزایش شدید تغییرمکان می‌شود.

مراجع

1. Westergaard, H.M., "Water Pressure on Dams During Earthquakes", *Transaction ASCE*, Vol. 98, PP. 418-433, (1933).

2. Kotsubo, S.m, "Dynamic Water Pressure on Dams due to Irregular Earthquakes", *Memoirs Faculty of Engineering, Kyushu university*, Fakuoka, Japan, Vol. 18, No. 4, (1959).

3. Zangar, C.N., "Hydrodynamic Pressure on Dams due to Horizontal Earthquake Effects", *U.S. Bureau of Reclamation, Engg*, Monograph No. 11, Denver, Colo., (1952).

4. Bustamante J.I., Rosenblueth, E., Herrera, I., and Flores, A., "Presion Hydrodynamic en Presasy Depositos", *Boletin Sociedad Mexicana de Ingenieria Sismica*, Vol. 11, No. 2, (1963).

5. Chopra, A.K., "Hydrodynamic Pressure on Dams during Earthquakes", *Proc., American Society of Civil Engineering, Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 93, No. 6, PP. 205-224, (1967**)**.

6. Chopra, A.K., "Earthquake Response of Concrete Gravity Dams", ", *Proc., American Society of Civil Engineering, Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 96, No. 4, PP. 443-454, (1970**)**.

7. Chakrabarti, P., Chopra, A.K., "Hydrodynamic Pressure and Response of Gravity Dams to Vertical Earthquake Component", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 1, No. 4, PP. 325-335, (1972).

8. Chwang, A. T., "Hydrodynamic Pressures on Sloping Dam during Earthquakes, Part2: Exact theory", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 87, PP. 343-348, (1987).

9. Tsai, C.S., Lee, G.C., Ketter, R.L., "A Semi-Analytical Method for Time-Domain Analyses of Dam-reservoir Interactions", *International journal for numerical method in engineering,* Vol.29, PP. 913-933, (1990).

10. Tsai, C. S., Lee, G. C., "Method for the Transient Analysis of Three-dimensional Dam-reservoir Interactions", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 116, No. 10, PP. 2151-2172, (1990).

11. Tsai, C.S., Lee, G.C., "Time-domain Analyses of Dam-reservoir System I: Exact Solution", *Journal of engineering mechanics,* (1991).

۱۲. عطارنژاد، ر.، فرساد، ع.، "حل بسته تحلیل اندرکنش سد و مخزن در حوزه زمان با در نظر گرفتن تغییرات ضخامت سد"، مجله دانشکده فنی، دوره ۳۹، شماره ۳، صفحات ۳۴۰-۳۲۹، (۱۳۸٤).

13. Fenves, G., Chopra, A.K., "Effect of Reservoir Bottom Absorption on Earthquake Response of Concrete Gravity Dams", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 11, PP. 809-829, (1983).

14. Bouaanani, N., Paultre, P., Proulx, J., "A Closed- from Formulation for Earthquake- induced Hydrodynamic Pressure on Dams", *Journal of Sound and Vibration,* Vol. 261, PP. 537-582, (2003).

15. Zingales, M., "Seismically Induced, Non-stationary Hydrodynamic Pressure in a Dam-reservoir System", *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 18, No. 2, PP. 151-163, (2003).

16. Navayi Neya, B., Alijani Ardeshir, M., "An Analytical Solution for Hydrodynamic Pressure on Dams Considering the Viscosity and Wave Absorption of the Reservoir", *Arabian Journal of Science Engineering*, Vol. 38, No. 8, PP. 2023-2033, (2013).

17. Chopra, Anil K., "Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering", Fourth Edition, Prentice Hall-International Series, (2011).

۱۸. علیجانی اردشیر، م.، "تعیین فشار هیدرودینامیک در مخزن سدهای بتنی وزنی تحت اثر بار دینامیکی با احتساب ویسکوزیته سیال"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه مازندران، (۱۳۸۸).

۱۹. یاسمی، م.، " حل بسته اندرکنش سد و مخزن تحت بارهای دینامیکی با احتساب ویسکوزیته مخزن"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، (۱۳۹۱) .

۲۰. احمدی، م.ت.، نوایی‌نیا، ب.، "تحلیل هیدرودینامیک سد و مخزن به روش لاگرانژی"، مجله بین المللی علوم مهندسی دانشگاه علم وصنعت ایران، جلد ٦، شماره ۱–ب، (۱۳۷٤).

21. Fenves, G., Chopra, A., “Earthquake Analysis and Response of Concrete Gravity Dams”, Earthquake Engineering Research Center, Report No. EERC-84/10, University of California, Berkeley, (1984).